

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka / Käyttö ja käynnissäpito

Asta Peltola

TUULENMITTAUKSEN KÄYTÄNNÖN TOTEUTUS

Opinnäytetyö 2012

TIIVISTELMÄ

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Energiatekniikka

PELTOLA, ASTA

Opinnäytetyö

Työn ohjaajat

Toimeksiantaja

Toukokuu 2012

Avainsanat

Tuulenmittauksen käytännön toteutus

39 sivua

lehtori Risto Korhonen, laboratorioteknikko Marko Piispa

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

tuulienergia, tuulenmittaus, mittausmasto, anemometri,
tuuliviiri, LIDAR, SODAR

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu osallistuu hankkeeseen, jonka tarkoitus on tukea tuulivoiman teknologiasovelluksia, niiden pilottitoimintaa ja kaupallistamista. Hankkeen yhtenä osana oli tarkoitus aloittaa KyAMK:n päästömittauslaboratoriossa tuulenmittauspalvelutoiminta. Toiminnan aloittamiseksi tehtiin selvitystyötä tuulenmittauksen käytännön toteutuksesta. Tutkittiin tuulenmittausvaihtoehtoja, niiden hankintahintoja sekä historiaa, lainsäädäntöä ja lupamenettelyä. Lisäksi selvitettiin, mitä vaaditaan uuden mittausjärjestelmän akkreditointiin sekä tämän hetkistä tuulenmittauksen kilpailutilannetta Suomessa.

Tuulenmittauksen käytännön toteutuksen suunnittelu aloitettiin kartoittamalla mittausmastoratkaisuja. Mastoratkaisuja valmistavan Vaisala Oy:n tarjoamien tuulenmittausmastojen vaihtoehtona tarkasteltiin maston vuokrausta EmPower Oy:ltä. Heti tutkimusten alkumetreillä havaittiin, että lupakäytäntö maston pystyttämiseksi on hankalaa ja aikaa vievää, lisäksi mastomittausjärjestelmä on kallis hankkia.

Seuraavaksi otettiin tarkasteluun LIDAR- ja SODAR- tuulenmittausjärjestelmät, joista ensimmäiseksi kyseltiin sähköpostitse valmistajilta hinta-arvioita. LIDAReista ei saatu kuin yksi vastaus. SgurrEnergy Ltd:n tarjoama Galion LIDAR osoittautui huomattavasti kalliimmaksi järjestelmäksi kuin SODAR-vaihtoehdot. Hankkeen budjetin puitteissa päädyttiin SODAR-järjestelmään.

SODAR- tuulenmittausjärjestelmät kilpailutettiin. Saatiin kolme tarjousta, joiden perusteella päätettiin hankkia Hafmex Engineering Oy:n tarjoama WindCollector2.

ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Energy Engineering

PELTOLA, ASTA

Bachelor's Thesis

Supervisor's

Commissioned by

May 2012

Keywords

Practical Implementation of Wind Measurement

39 pages

Risto Korhonen, Senior Lecturer and Marko Piispa, Laboratory Technician

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

wind measurement, anemometer, vane, LIDAR, SODAR,

Kymenlaakso University of Applied Sciences takes part in the RENEWTECH project. The project aims to commence a wind measurement service for the needs of the wind power industry. The wind measurement service is planned to be commenced by Emission Measurement Laboratory of Kymenlaakson ammattikorkeakoulu, University of Applied Sciences. Comprehensive background study on the practical implementation of wind measurement and its cost was done.

First, wind measurement masts were studied. The mast solutions were too difficult to implement because of the law and licensing. Next, the LIDAR and SODAR wind measurement systems were investigated. LIDAR was too expensive for the project. It was decided to examine the SODAR wind measurement systems more closely and put them out to tender. Three bids were received. It was decided to acquire Hafmex Engineering Oy's WindCollector2.

The study was done mostly on the Internet and through e-mail conversations with equipment manufactures. Also, publications offered by the manufacturers and published research papers on the topic were made use of.

It is expected that today's wind measurement systems will be developed further for larger wind turbines of the futures.

ALKUSANAT

Opinnäytetyö on tehty Kymenlaakson ammattikorkeakoululle. Työssä tutkittiin tuulenmittausjärjestelmiä ja niiden hankintakustannuksia. Selvitystyön tuloksena saatiin rajattua tuulenmittausjärjestelmistä KyAMK:lle sopivin mittausjärjestelmä. Tuulenmittausjärjestelmien kilpailutuksen perusteella tehtiin hankinta päätös.

Opinnäytetyön ohjaavana opettajana toimi lehtori Risto Korhonen ja toisena ohjaajana laboratorio teknikko Marko Piispa, joka oli toimeksiantajan edustaja. Kiitokset molemmille ohjauksesta ja kannustuksesta, ilman teitä tämä työ ei olisi ikinä valmistunut.

Haluan erityisesti kiittää aviomiestäni pitkäjänteisyydestä opintojeni jatkuessa suunniteltua pidempään ja appivanhempiani lastenhoitoavusta kirjoitustyön venyessä myös iltatunneille. Lisäksi haluan kiittää rakkaita ystäviäni henkisestä tuesta.

Kotkassa 23.5.2012

Asta Peltola

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

1	JOHDANTO	6
2	TUULENMITTAUKSEN HISTORIAA	7
	2.1 Kuppianemometrin historiaa	7
	2.2 SODARin historiaa	8
	2.3 LIDARin historiaa	9
3	MASTOMITTAUS	10
	3.1 Mittarit	10
	3.1.1 Kuppianemometri	10
	3.1.2 Potkuri/propelli –anemometri	12
	3.1.3 Akustinen anemometri	13
	3.1.4 Tuulensuuntainstrumentit	15
	3.2 Masto	15
	3.3 Lainsäädäntö ja lupamenettely	18
4	TUULEN ETÄMITTAUS	20
	4.1 Doppler-ilmiö	21
	4.2 SODAR	23
	4.3 LIDAR	25
5	AKKREDITOINTI	29
	5.1 Ensiarvionti	30
	5.2 Akkreditoinnin ylläpito	31
	5.3 Oikeudet ja velvoitteet	32
	5.4 KyAMK:n akkreditointi	33
6	KUSTANNUKSET	33
7	KILPAILUTILANNE	35
8	LOPPUPÄÄTELMÄT	36
	LÄHTEET	37

1 JOHDANTO

Tuulivoiman lisärakentaminen on asetettu kansalliseksi tavoitteeksi Suomen hallituksen toimesta, jotta saavutettaisiin EU:n tavoitteet vähentää energiantuotannon päästöjä sekä lisätä uusiutuvan energiantuotannon osuutta. Kokonaistavoitteena on 2500 MW tehon tuotanto tuulivoimalla vuoteen 2020 mennessä. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi on tuulienergian tuotantokapasiteetin kasvatettava yli kymmenkertaiseksi. Tuulivoiman lisäämiseksi Kaakkois-Suomeen on käynnistetty tuulivoimaklusteri, joka edesauttaa paikallista tuulivoimateollisuutta ja -osaamista. (RENEWTECH, osaprojektin kuvaus: 2.)

Tuulivoiman ja loma-asutuksen yhteensovittamisen sekä lupakäytäntöjen haasteellisuuden vuoksi Suomen hyvätuulisille rannikkoalueille rakentaminen on vaikeaa, joten on alettu hakea sopivia paikkoja tuulivoimatuotannolle heikompiuudisilta alueilta. Tämä on lisännyt tarvetta kehittää tuulivoimaloiden teknologiaa. RENEWTECH hankke vastaa juuri tähän kehitystarpeeseen. (RENEWTECH, osaprojektin kuvaus: 2.)

Hankkeen RENEWTECH - Tuulivoimateknologian ja –liiketoiminnan kehittämisen tavoitteena on

- 1) kehittää tuulivoimatuotantoon soveltuvia kaupallisia menetelmiä ja teknologia-sovelluksia sekä edesauttaa niiden käyttöönottoa
- 2) kehittää kansainvälistä huippuosaamista virtaustekniikassa sekä uusia kaupallistettavia menetelmiä virtausmallinnukseen ja energiantuotannon arviointiin
- 3) tunnistaa uusia liiketoimintamahdollisuuksia tuulivoimaloiden käyttö ja huoltopalveluissa sekä niihin liittyvässä laitetekniikassa
- 4) luoda tuulivoimaklusterin logistinen järjestelmä ja siihen liittyvät teknologia-sovellukset
- 5) tuottaa tuulivoimalavalmistukseen kytkeytyvän teollisuuden sekä projektikehittäjien T&K-, testaus- ja seurantapalveluita sekä kartoittaa tuulivoimalakoulutuksen rakennetta.

(RENEWTECH, projektin aloituskokouksen pöytäkirja: 1.)

Kymenlaakson ammattikorkeakoulu (KyAMK) osallistuu hankkeeseen kahdella osaprojektilla, joista ensimmäinen on NELI: Tuulivoimaklusterin logistinen järjestelmä ja toinen Energiatekniikka: T&K, testaus- ja mittauspalvelut sekä osaamisrakenteiden kehittäminen. Jälkimmäisen osaprojektin tavoitteena on KyAMK:ssa toimivien kor-

keatasoisten akkreditoitujen teollisuudelle mittaus- ja testauspalveluita tuottavien laboratorioden palvelutarjonnan laajentaminen voimakkaassa kasvussa olevan tuulivoimateollisuuden tarpeisiin. (RENEWTECH, projektin aloituskokouksen pöytäkirja: 1.)

Päästömittauslaboratorion akkreditointi kattaa tällä hetkellä kaksi osa-aluetta:

- 1) päästömittaukset: prosessiteollisuuden sekä moottoreiden poistokaasut, kenttätestaus
- 2) päästökauppaan liittyvät analyysit: polttoaineen testaus.

Lisäksi on akkreditoitu pätevyys materiaalien testauksesta, betonin testaus. (FINAS, Akkreditointipäätös.)

Hankkeen yksi tavoite on tuottaa mittauspalveluita muun muassa meteorologisiin tuulimittauksiin. Työni tarkoitus oli tutkia tuulimittausjärjestelmiä, joilla voitaisiin tuottaa näitä mittauspalveluita. Lisäksi hankkeen tavoitteiden mukaisesti tutkittiin uuden mittausjärjestelmän akkreditointia. (RENEWTECH, osaprojektin kuvaus: 5.)

On tärkeää mitata tuuliolosuhteita ennen tuulivoimalan investointipäätöksen tekoa, jotta tiedettäisiin voimalan tuotto ja näin ollen hankkeen kannattavuus. Mahdollisimman hyvä tuotto ja laitteiston ehjänä pysyminen saadaan, kun valitaan juuri kyseisiin tuuliolosuhteisiin sopiva tuulivoimala. Lapoihin ylä- ja ala-asennossa kohdistuvat erilaiset voimat rasittavat tuulivoimalaa, ja tämän vuoksi tuulenmittaukset on tehtävä usealta eri korkeudelta. Puuskainen tuuli voi myös aiheuttaa rikkoutumisen, jos sitä ei ole otettu jo suunnitteluvaiheessa huomioon. (Haapanen 2010.)

Mittausjärjestelmien tutkiminen aloitettiin mastotuulenmittausjärjestelmistä ja niihin liittyvistä lupa-asioista. Mastomittaus todettiin hankkeen tarpeisiin epäsopivaksi, joten seuraavaksi kartoitettiin LIDAR- ja SODAR- tuulenmittausjärjestelmiä, ja selvitystyön tuloksena päädyttiin kilpailuttamaan SODAR-laitteita.

2 TUULENMITTAUKSEN HISTORIAA

2.1 Kuppianemometrin historiaa

Tuulta on Suomessa mitattu jo 1800-luvulla, mutta luotettavia nopeusmittauksia on tehty vasta 1880-luvulta lähtien, jolloin Helsingissä otettiin käyttöön uusi Robinsonin

kuppianemometri. Anemometrissä, joka on nimetty irlantilaisen T.R. Robinsonin mukaan, on tavallisesti neljä puolipallonmuotoista kuppia ristikon päissä ja se pyörii vaakatasossa akselinsa ympäri. Robinsonin kuppianemometri on ollut lähtökohta nykyisille kuppianemometreille, jotka ovat yhä yleisiä tuulen nopeuden mittauksessa. (Leskinen: 98.)

Sodankylään perustettiin vuosina 1882–1883 sääasema, jossa tuulen suunta havaittiin tuuliviirillä 16 suuntaan jaotetusti ja nopeus määritettiin Robinsonin anemometrillä. Koska tuulimittareiden tuli olla luettavissa sisätiloista, oli laitteiston oltava kohtalaisen suuri. Kupin halkaisija on tässä laitteessa 30 cm ja kuppiristikon leveys 90 cm. Anturi painoi 7,5 kiloa, eikä minkään muun Suomessa käytetyn Robinsonin anemometrin ole kerrottu olleen näin suuri kooltaan. (Leskinen: 98.) Kuvassa 1 nähdään kuppianemometriä kuppien kokoja ennen ja nyt (Rinne 2005: 7).



Kuva 1. Kuppianemometriä kuppia (Rinne 2005: 7).

2.2 SODARin historiaa

SODAR (SOund Detection And Ranging) perustuu äänipulsseihin ja niiden takaisinsirontaan (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 80).

Äänen etenemistä ilmakehässä on tutkittu viimeiset 200 vuotta, mutta vasta viimeisen 50 vuoden aikana akustista sirontaa on käytetty ilmakehän alempien osien tutkimiseen. Toisen maailmansodan aikaan Neuvostoliitossa alettiin kiinnostua akustisesta takaisinsironnasta niin kokeellisesti kuin teoreettisesti. Tiedemiehet Australiassa osoittivat, että ilman kaiut voitaisiin luotettavasti saada useasta sadasta metristä. 1960- ja 70-lukujen vaihteessa tutkijat osoittivat, että on mahdollista käyttää akustista ääni-

luotausta tuulen mittaamiseen käyttäen apuna doppler-ilmiötä ja seuraamalla lämpötilojen inversioiden rakennetta. (About Sodar.)

1970-luvulla useat yhdysvaltalaiset ryhmät alkoi kehittää akustista kaikuluotausta. Yksi ensimmäisistä järjestelmistä oli suunniteltu pääsääntöisesti mittaamaan ilmakehän turbulenttirakennetta ja saavuttaen jopa usean sadan metrin korkeuden. 1975 kehitettiin ensimmäinen digitaalipohjainen akustinen kaikuluotain, johon sisällytettiin tietokonejärjestelmän. 1980-luvulla kehiteltiin useita rinnakkaisia järjestelmiä Doppler SODAR-järjestelmälle, mutta näitä ei nykyään ole tuotannossa kuin yhdellä yrityksellä. (About Sodar.)

1990-luvulla SODAR-järjestelmissä alettiin käyttämään kannettavia tietokoneita järjestelmän valvontaan ja käyttöön. Tästä johtuen järjestelmästä saatiin hyvin yksinkertainen verrattuna aikaisempiin järjestelmiin, jotka tarvitsivat laajaa ulkoista elektronikka ja suuren atk-järjestelmän. (About Sodar.)

2.3 LIDARin historiaa

LIDAR (LIght Detection And Ranging) perustuu lähetettävään valonsäteeseen ja sen takaisinsirontaan (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 80).

1930-luvulla valonheitinkokeista sai alkunsa LIDAR-teknologian kehitys jo paljon ennen toimivan laserin keksimistä. Vuonna 1939 pysyttiin valonheittimellä mittaamaan aerosoli- ja molekyyliitiheyttä jopa 34 kilometriin asti. Rubiinilaserin myötä LIDAR yleistyi ilmakehän tutkimisessa kaikissa ilmakehän kerroksissa. (Järvinen 2011: 17.)

1960-luvun puolivälissä alkoi tuuli-LIDARien kehitys, kun heterodyyni-menetelmää keksittiin soveltaa optiseen tuulennopeuden mittaamiseen. Heterodyyni-menetelmässä kaksi taajuudeltaan vain vähän poikkeavaa signaalia sekoitetaan hyvin tunnetun huojuntailmiön aikaansaamiseksi. (Järvinen 2011: 4.)

3 MASTOMITTAUS

3.1 Mittarit

3.1.1 Kuppianemometri

Kuppianemometri on luultavasti kaikkein yleisin tuulennopeuden mittauslaite. Kuppianemometri pyörii, jolloin pyörimisnopeus vaihtelee suhteessa tuulen nopeuteen ja tuottaa signaalin. Nykypäivän yleisin malli sisältää kolme kuppia asennettuna pieneen akseliin. Kuppien kierrosten lukumäärää voidaan mitata

- mekaanisella laskurilla, joka laskee kierrosten lukumäärän
- sähköisiä tai elektronisia jännitemuutoksia mittaamalla (AC tai DC)
- valosähkökatkaisijalla.

(Manwell, McGowan & Rogers 2009: 77.)

Mekaanisella laskurilla varustettu anemometri osoittaa tuulen virtausta etäisyytenä, josta saadaan tuulen nopeus jakamalla se tuulen puhaltamalla ajalla. Tämän tyyppisen anemometrin etuna on, ettei se tarvitse ollenkaan virtalähdettä. Joissakin aikaisimmissa mekaanisissa anemometreissa oli myös piirturi, mutta tällainen järjestelmä oli kallis ja hankala ylläpitää. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 77–78.)

Elektroninen kuppianemometri kertoo välittömästi mitatun tuulennopeuden. Pyörivän karan alapäähän on kytketty miniatyyri vaihto- tai tasavirtageneraattori ja analoginen lähtö, joka muuntaa tuulen nopeutta erilaisin menetelmin. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 78.)

Valosähkökytkimellä varustettu kuppianemometri sisältää levyn, joka sisältää 120 aukkoa ja valokennon. Aukkojen säännöllinen kulku tuottaa pulssin joka kierroksella, jonka kuppi tekee. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 78.)

Kuppianemometrin vaste ja tarkkuus määräytyvät sen painon, fyysisten mittojen sekä sisäisen kitkan mukaan. Muutamalla jotakin näistä parametreista mittalaitteen vaste muuttuu. Turbulenttisuutta mitattaessa halutaan pieni, kevyt ja matalakitkainen mittalaite, ja tyypillisesti tällainen kaikista herkimmän mittalaitteen matkavakio on noin 1 metri. Sellaisissa mittauksissa, jossa ei vaadita turbulenttisuuden mittausta, kupit ovat

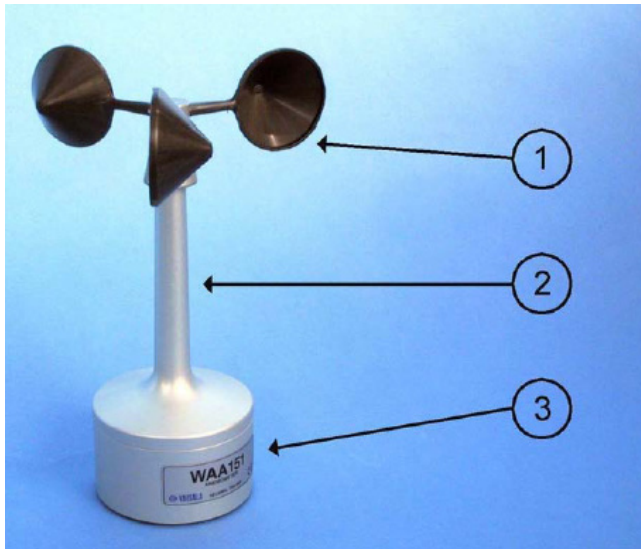
suuremmat ja painavammat ja vakio kahdesta viiteen metriin. Tämä rajoittaa käyttökelpoista näytteenottoa korkeintaan muutaman sekunnin välein tapahtuvaksi. Kuppianemometreillä päästään tyypillisesti ± 2 prosentin tarkkuuteen, joka perustuu tuulitunnelitesteihin. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 78.)

Ympäristötekijät voivat vaikuttaa kuppianemometriin ja vähentää sen luotettavuutta. Näihin kuuluvat jää ja lentävä pöly. Pöly voi keräytyä laakereihin aiheuttaen suurempaa kitkaa ja kulumista, joka vähentää mittalaitteen antamaa tuulen nopeuden lukemaa. Jos kuppianemometri jäätyy, sen pyöriminen hidastuu tai pysähtyy kokonaan. Tämä aiheuttaa virheellisen tuulennopeuden signaalin kunnes mittalaite sulaa kokonaan. Lämmitettyjä kuppianemometrejä voidaan käyttää, mutta ne tarvitsevat huomattavan suuren virtalähteen. Näiden tekijöiden vuoksi kuppianemometri vaatii kalibrointia ja tarkistuskäyntejä luotettavuuden takaamiseksi. Se kuinka usein näitä käyntejä tehdään, riippuu sijoituspaikan olosuhteista ja kuinka tärkeää on saada tarkkaa dataa. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 78.)

Kuvassa 2 on suomalaisen Vaisalan valmistamat WA15-tuulisarjan tuulianturit: vasemmassa reunassa kuppianemometri ja oikealla tuuliviiri. Kyseisen sarjan anturit on suunniteltu toimimaan kylmissä olosuhteissa, joten niissä on lämmitetty akseli estämässä laakerien jäätymistä. Kartionmalliset kuppianemometrit takaavat erinomaisen mittauksen lineaarisuuden ja anemometreillä on alhainen mittauksen aloituskyky. (Vaisala kotisivut) Kuvassa 3 näkyy hyvin kuppianemometrin osat: 1) kuppipyöräasetelma, 2) anturin varsi ja 3) anturin alaosa. (Vaisala WAA151 käyttäjän opas: 8.)



Kuva 2. Vaisala-tuulianturisarja WA15 tuuliantureita (Vaisala kotisivut).



Kuva 3. Vaisalan WAA151 kuppianemometri (Vaisala WAA151 käyttäjän opas: 8).

3.1.2 Potkuri/propelli –anemometri

Potkurianemometrissä tuuli pyörittää potkuria, joka taas pyörittää akselia. Akselin päässä on joko vaihto- tai yleisemmin tasavirtageneraattori, tai valonkatkoja tuottaa pulssisignaalia. Tätä mallia käytetään tuulivoimasovelluksissa, koska siinä on nopea vaste ja se käyttäytyy lineaarisesti muuttuvissa tuuliolosuhteissa. Tyypillisesti vaakasuorassa kokoonpanossa potkuri saadaan pidettyä suunnattuna tuulta kohti tuulivierin avulla, jota voidaan käyttää myös tuulen suunnan näyttäjänä. Potkurianemometrin tarkkuus on $\pm 2\%$ aivan kuten kuppianemometrilläkin. Potkurianemometrit tehdään yleensä polystyreenistä eli styroksista tai polypropyleenistä. Käytön ongelmat ovat tässä järjestelmässä samanlaiset kuin edellä mainitulla kuppianemomerillä. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 79.)

Kun potkuri kiinnitetään kiinteään pystysuoraan varteen, voidaan potkurianemometrillä mitata tuulen pystysuoria virtauksia. Kuvassa 4 on tuulenmittaus toteutettu kolmella komponentilla. Potkurianemometri reagoi ensijaisesti vain sen akselin suuntaiseen tuuleen eikä kohtisuorassa akseliin tulevalla tuulella ole mitään vaikutusta. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 79.)



Kuva 4. Potkurianemometri kolmella propelilla (Alliance for Coastal Technologies).

3.1.3 Akustinen anemometri

Akustinen anemometri on alun perin kehitetty 1970-luvulla. Ultraääniaaltoja käytettiin mittaamaan tuulen nopeutta ja suuntaa. Mittaus perustuu äänipulssien lentoaikaan anturiparien välillä. Yksi-, kaksi- tai kolmiulotteinen virtaus voidaan mitata anturiparien signaalien avulla. Tuulienergiasovelluksissa käytetään tyypillisesti kaksi- tai kolmiulotteisia akustisia anemometrejä. Spatiaalinen resoluutio määräytyy antureiden välin pituudesta, joka on yleensä 10–20 cm. Akustista anemometriä voidaan käyttää turbulenssin mittaamiseen hyvällä ajallisella tarkkuudella (20 Hz tai parempi). (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 79–80.)

Kuvissa 5 ja 6 on Vaisalan WINDCAP® -ultraäänituuliantureita, jotka käyttävät ultraääntä määrittämään vaakatuulen nopeuden ja suunnan (kaksiulotteinen tuulianturi). WINDCAP® -antureissa ei ole liikkuvia osia, joten ne ovat vapaita perinteisten mekaanisten tuuliantureiden haasteista kuten esimerkiksi kitkasta. Ainutlaatuisen kolmiomuotonsa ansiosta nämä anturit ovat erittäin tarkkoja tuulen suunnan mittauksessa. Kylmässä ilmastossa niitä voidaan lämmittää, niillä ei ole huoltotarvetta eivätkä ne vaadi kentällä kalibrointia. (Vaisala WINDCAP® -esite.)



Kuva 5. Vaisala WINDCAP® -ultraäänituulianturi WMT700 (Vaisala kotisivut).



Kuva 6. Vaisala WINDCAP® -ultraäänituulianturi WMT52 (Vaisala kotisivut).

Kolmiulotteinen tuulianturi, kuvassa 7, on todettu hyödylliseksi etenkin sellaisissa paikoissa, joissa on suuria maantieteellisiä korkeuseroja esimerkiksi mäkiä tai metsää. Kolmiulotteisella tuulianturilla voidaan mitata pystysuoria tuulivirtauksia ja se voidaan sijoittaa esimerkiksi maston huipulle. (Vaisala tarjous 1.)



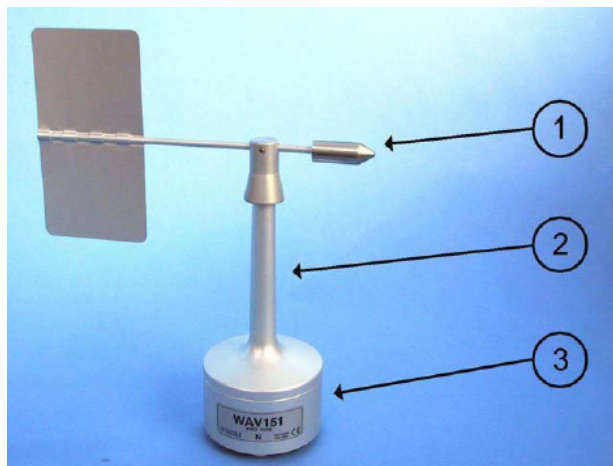
Kuva 7. 3D- ultraääni tuulianturi (Metek).

3.1.4 Tuulensuuntainstrumentit

Tuulen suuntaa mitataan yleensä tuuliviirin avulla. Tavanomaisessa tuuliviirissä on leveä häntä, jonka tuuli kääntää pystysuoran akselin myötätuulen puolelle. Vastapaino antaa tasapainoa ja on akselistä katsottuna tuulen yläpuolella. Akselin kitkaa on alennettu laakereilla, jotta vähäinenkin siipeen osuva voima aloittaa liikkeen. Esimerkiksi tavallisesti tällainen voiman raja-arvo on suuruusluokkaa 1 m/s tuulta. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 81–82.)

Tuuliviiri yleensä tuottaa signaaleja kontaktorilla tai potentiometrillä. Potentiometrillä saadaan parempi tarkkuus kuin kontaktorilla, mutta se on kalliimpi hankkia. Tuuliviiriin vaikuttavat samat ympäristölliset ongelmat kuin kuppi- ja potkurianemometreihin. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 82.)

Kuvassa 8 on Vaisalan valmistama tuuliviiri, joka on myös kuvassa 2 asennettuna puumiin. Tässä tuuliviirissä on lämmitys kylmiä olosuhteita varten. (Vaisala kotisivut). Kuvassa näkyy hyvin tuuliviirin osat, jotka ovat 1) tuuliviirin kokoonpano, häntä ja vastapaino 2) anturin varsi ja 3) anturin alaosa (Vaisala WAV151 käyttäjän opas: 8).



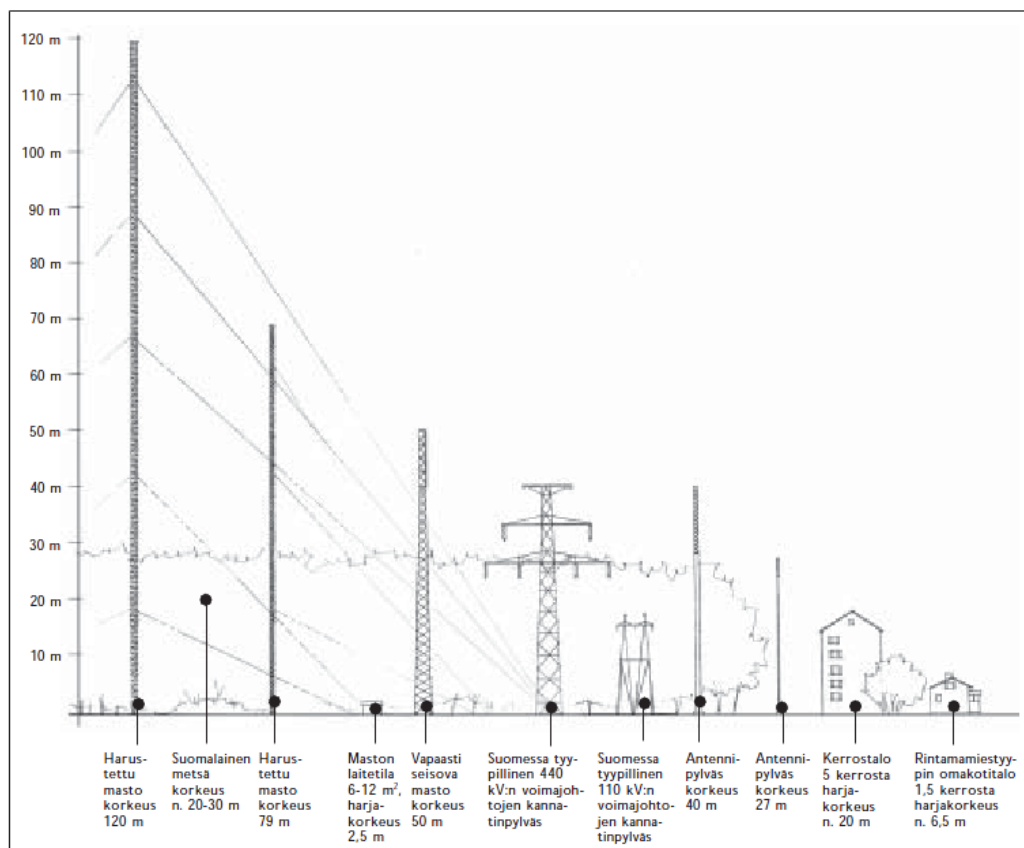
Kuva 3.7 Vaisalan WAV151 tuuliviiri (Vaisala WAV151 käyttäjän opas: 8).

3.2 Masto

Koska tuulen nopeutta ja suuntaa halutaan mitata samalta korkeudelta kuin mikä tuuliturbiinin napakorkeus tulisi olemaan, tarvitaan mittaustasto, joka minimissään yltää

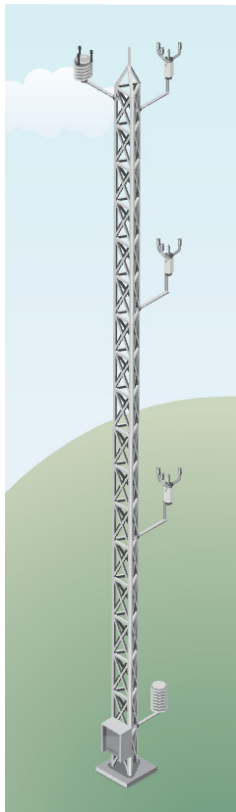
20 metriin ja aina jopa yli 150 metrin korkeuteen. Joskus voidaan käyttää jo olemassa olevia telemastoja, jos ne sijaitsevat lähellä tarkasteltavaa aluetta, mutta useimmiten joudutaan pystyttämään masto erityisesti tuulen mittausjärjestelmälle. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 82.)

Mittausmastoja on monia erilaisia: haruksettomia, ristikko- tai onttorakenteisia mastoja sekä ylös asti harustuettuja mastoja. Mastot, joissa on harukset ylös asti, ovat nykypäivänä maalle rakennettavista mastoista yleisimpiä. Nämä mastot on erityisesti suunniteltu tuulenmittauksiin, ja ne ovat erittäin kevyitä sekä helposti siirrettäviä. Ne tarvitsevat vain kevyet perustukset, ja pystytys onnistuu alle päivässä. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 82.)



Kuva 9. Erilaisia mastotyyppejä vertailussa. Piirros Emilia Weckman. (Ympäristöministeriö: 7).

Kuvassa 9 on esitetty erilaisia mastotyyppejä, joita suomalaisesta maisemasta löytyy. Kuvan mastot ovat esimerkkejä telemastoista, mutta tuulenmittauksessa käytettävät mastot ovat samanlaisia kuin kuvassa olevat korkeimmat mastot. Kuvasta näkyy myös hyvin, kuinka mastot asettuvat suomalaiseen maisemaan. (Ympäristöministeriö: 7.)



KUVA 10. Tuulenmittausmasto akustisilla anemometreillä (Vaisala tarjous 2).

Mittausanturit tulee asentaa usealle eri korkeudelle. Kuvassa 10 on Vaisalan ultraäänianturit asennettu kolmelle eri korkeudelle, jotta saadaan kattavasti tietoa tuulesta eri korkeuksilta (Vaisala tarjous 2). Tuulianturit on hyvä asentaa hieman erilleen mastosta teleskooppipuomien avulla. Kuvassa 11. on asennettu samaan puomiin kaksi anturia lisäämällä vielä puomin päähän pystysuuntainen lisäpuomi, kuppianemometri ylös ja akustinen anemometri alas (Vaisala tarjous 1).



Kuva 11. Teleskooppi-instrumentointipuomi (Vaisala tarjous 1: 21).

3.3 Lainsäädäntö ja lupamenettely

Aivan samoja ympäristölainsäädännön alueiden ja ympäristön käyttöä koskevia säännöksiä sovelletaan niin mastojen kuin muuhunkin rakentamiseen. Maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999, MRL) kaava- ja lupajärjestelmä asettaa vaatimukset rakentamiselle. Myös luonnonsuojelulaki ja muinaismuistolaki asettavat omat rajoituksensa mastojen rakentamiselle. (Ympäristöministeriö: 28.)

Kuntien rakennusviranomaiset päättävät, tarvitseeko masto rakennus- tai toimenpide-luvan, kuten yleensä se tarvitsee. Maankäyttö- ja rakennuslain 113. §:n mukaan suu-rehkoja, maisemaan tai muutoin ympäristöön merkittävästi vaikuttavia mastoja pide-tään rakennuksina ja rakennuksen rakentaminen edellyttää rakennuslupaa. Maankäyt-tö- ja rakennusasetuksen 62. §:n mukainen toimenpidelupa sellaisille mastoille, joita ei pidettävä rakennuksina. Oikeuskäytäntö mastojen rakentamisen osalta on vähäistä, mutta sen mukaan 60 metriä korkean maston rakentamisen on katsottu edellyttävän rakennuslupaa. Pääosin 1970- ja 1980-luvuilta peräisin oleva oikeuskäytäntö on melko vanhaa ja siitä voidaan vain rajoitetusti tehdä johtopäätöksiä. (Ympäristöministeriö: 29.)

Kymenlaakson ammattikorkeakoululle hankittavan mittausmaston ensimmäiseksi si-joituspaijaksi olisi tullut Kotka, joten tiedustelin Kotkan kaupungin rakennusviran-omaisilta, minkälainen lupa tarvittaisiin 100 metriä korkealle mittausmastolle, joka olisi paikallaan 12 kuukautta. Tarkastusarkkitehti Juha Vulkko Kotkan kaupungin ra-kennusvalvonnasta kertoi, että kyseinen masto tarvitsisi rakennusluvan.

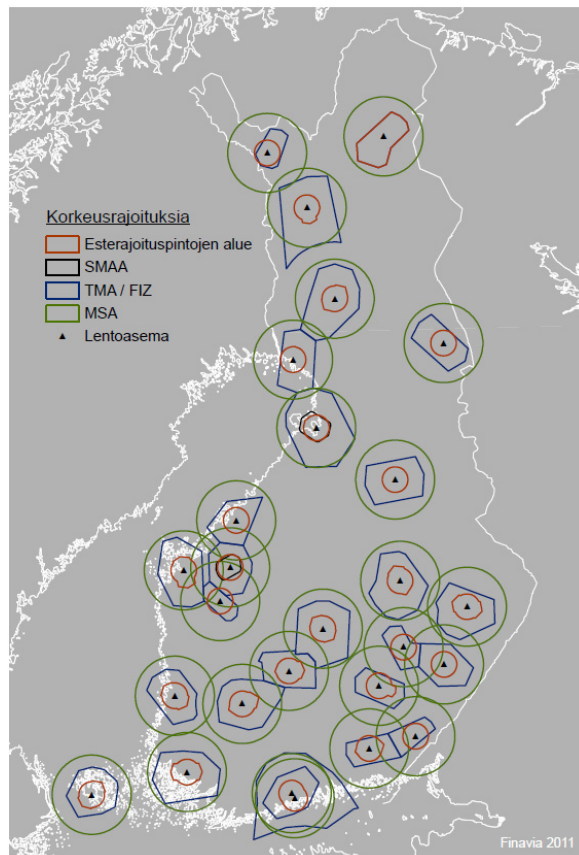
Rakennuslupaa mastolle haettaessa tulee lupahakemukseen liittää selvitys hankkeen vaikutuksista maisemaan ja naapureihin, selvitys hakijan lähimmistä suunnitelluista muista mastoista sekä selvitys siitä, onko maston tarkoitusta palvelevia yleiseen tele-verkkoon jo kuuluvan maston vapaita antennipaikkoja käytettävissä (MRA 64§). Ra-kennusluvan yhteydessä on myös pyydetty lausunto ELY-keskukselta silloin, kun rakennuspaikka on luonnonsuojelun kannalta merkittävällä alueella tai maakuntakaa-vassa virkistys tai suojelualue (MRL 133§).

Ilmailulaki (1194/09) edellyttää 165 §:ssä, että laitteen, rakennuksen, rakennelman tai merkin asettamiseen tarvitaan lentoestelupa, jos este

- 1) ulottuu yli 10 metriä maanpinnasta ja sijaitsee lentopaikan, kevytlentopaikan tai varalaskupaikan kiitotien ympärillä olevan suorakaiteen sisällä, jonka pitkät sivut ovat 500 metrin etäisyydellä kiitotien keskilinjasta ja lyhyet sivut 2 500 metrin etäisyydellä kiitotien kynnyksistä ulospäin
- 2) ulottuu yli 30 metriä maanpinnasta ja sijaitsee 1 kohdassa tarkoitetun alueen ulkopuolella mutta kuitenkin enintään 45 kilometrin etäisyydellä 81 §:ssä tarkoitetun lentoaseman mittapisteestä
- 3) ulottuu yli 30 metriä maanpinnasta ja sijaitsee 1 kohdassa tarkoitetun alueen ulkopuolelta, mutta kuitenkin enintään 10 kilometrin etäisyydellä varalaskupaikan tai muun lentopaikan kuin 81 §:ssä tarkoitetun lentoaseman mittapistestä
- 4) ulottuu yli 60 metriä maanpinnasta ja sijaitsee 1-3 kohdassa tarkoitettujen alueiden ulkopuolella.

Mastosta on pyydettävä etukäteen lausunto Ilmailulaitokselta, jossa arvioidaan, saako mastoa pystyttää. Jos siitä on haittaa lentoliikenteelle, Ilmailulaitos voi kieltää maston pystytyksen, jos kieltämisestä ei aiheudu huomattavaa haittaa maan omistajalle tai siihen kohdistuvan erityisen oikeuden haltijalle. (Ilmailuasetus 1§). Finavian (ilmailulaitoksen) lausunto tarvitaan lentoesteluvan liitteeksi lupaa haettaessa Liikenteen turvallisuusvirasto Trafilta. Lupavaatimus koskee uuden lentoesteen asettamista ja olemassa olevan esteen korottamista tai sijaintipaikan muuttamista. (Finavia.)

Jo hankkeen varhaisessa suunnitteluvaiheessa kannattaa käyttää Finavian laatimaa paikkatietoaineistoa, jossa on kuvattu erilaisia korkeusrajoitusalueita. Siihen on liitetty ominaisuutena esteen suurin sallittu huippukorkeus metreinä merenpinnan tasosta. Yleiskuvan aineiston sisällöstä antaa kuvassa 12 oleva kartta. (Finavia.)



Kuva 12. Ilmailulain vaatiman lentoesteluvan rajoja (Finavia).

4 TUULEN ETÄMITTAUS

Kun mittalaite ei ole fyysisessä kosketuksessa mitattavan ilmakerroksen kanssa, on kyse ilmakehän etämittauksesta eli kaukokartoituksesta. Kaukokartoituksessa tavallisesti vuorovaikutus mittalaitteiston ja mitattavan objektin kanssa tapahtuu sähkömagneettisen säteilyn tai akustisten aaltojen kautta ja mittaus voi tapahtua esimerkiksi maasta, lentokoneesta tai satelliitista käsin. Tällä menetelmällä on mahdollista tutkia kaukaisemmastakin tilavuudesta mm. lämpötilaa, kosteutta, eri aineiden ja aerosolien pitoisuuksia tai pienhiukkasten kuten vulkaanisen tuhkan määrää. Tuulen nopeuden mittaaminen on kuitenkin määrällisesti suurin sovelluskohde kaukokartoitukselle. Meteorologiassa käytetään paikallisten säähavaintojen tekoon tuulen nopeuden ja suunnan etämittausta, jotka voivat olla muun muassa osa laajempaa sääennustetta. Tuulen mittaamisen tiettyjä sovelluksia käytetään purjehduskilpailuissa ja sotilaskäytössä tykistön ja raketinheittimien käytön avuksi. (Järvinen 2011: 3-4.)

Kaukokartoitusteknologioita, jotka mittaavat tuulen nopeuden suoraan Doppler-ilmiöstä, ovat LIDAR, SODAR ja RASS. LIDAR hyödyntää optista aallonpituusalu-

etta, SODAR lähettää ja vastaanottaa ääniaaltoja, kun taas RASS yhdistää akustisten ja sähkömagneettisten aaltojen hyväksikäytön. (Järvinen 2011: 3-4.)

4.1 Doppler-ilmiö

Doppler-ilmiö on nimetty itävaltalaisen fyysikon Christian Dopplerin mukaan. Doppler-ilmiö on ominaista kaikelle aaltoliikkeelle. Kun periodisten aaltojen lähde ja havaitsija ovat liikkeessä suhteessa väliaineeseen, jossa aallot etenevät, havaitsijan mittaama aaltoliikkeen taajuus poikkeaa lähteen lähettämästä taajuudesta. Mitattava taajuus voidaan laskea kuvan 14 merkintöjä käyttäen seuraavasti:

$$v' = \frac{V_{aalto} - V_H}{V_{aalto} - V_L} v_0, \quad (1)$$

missä

v' on havaitsijan mittaama taajuus, [Hz]

V_{aalto} on aaltoliikkeen etenemisnopeus [m/s]

V_H on havaitsijan nopeus [m/s]

V_L on lähteen nopeus [m/s].

Kuvassa 14 on esimerkki, miten LIDARin laservaloa sirottava hiukkanen on havainnoitsijana valon kulkiessa pois päin LIDAR-laitteesta ja lähteenä, kun valo siroaa hiukkasesta takaisin kohti LIDAR-vastaanotinta. LIDAR-mittauksessa mittalaite on paikoillaan ja valoa sirottava hiukkasjoukko tuulesta johtuvassa liikkeessä. Hiukkasten nopeudet ovat paljon valon nopeutta c pienempiä ja tästä johtuen taajuus siirtymän noin suuruus voidaan yhtälön 1 ja kuvan 14 merkintöjen avulla saada

$$\Delta v_{Doppler} = \left(\frac{c - V_{LOS}}{c + V_{LOS}} \right) v_0 - v_0 \cong -\frac{2V_{LOS}}{\lambda} v_0, \quad (2)$$

missä

$\Delta v_{Doppler}$ on Doppler siirtymä [m]

c on valonnopeus [m/s]

V_{LOS} on ilmakehän hiukkasten nopeus lasersäteiden suunnassa [m/s]

v_0 on lähtevän säteen taajuus [Hz]

λ on valon aallonpituus [m].

Kuvassa 14 ja yhtälössä 2 V_{LOS} on ilmakehän hiukkasten nopeus lasersäteen suunnassa (Line-Of-Sight). V_{LOS} saadaan tuulivektorin skalaariprojektioista kentän aaltovektorille. Kentän normeeratun aaltovektorin ja kolmiulotteisen tuulivektorin avulla voidaan laskea projektio pistetulona

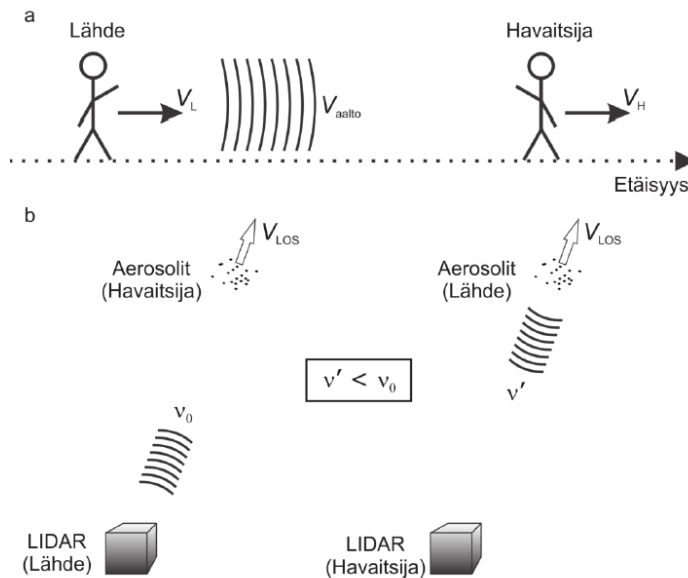
$$V_{LOS} = \hat{k} \cdot \underline{V}_{tuuli} = \|\underline{V}_{tuuli}\| \cos(\hat{k}, \underline{V}_{tuuli}) \quad (3)$$

missä

\hat{k} on lasersäteen suuntainen yksikkövektori

\underline{V}_{tuuli} on tuulivektori.

Jotta saadaan määritettyä tuulivektori eli mittaustilavuudessa vallitsevan tuulen suunta ja suuruus V_{LOS} tulee määrittää vähintään kolmen toisistaan hieman poikkeavaan suuntaan. Parametriesitys yhtälöstä 3 voidaan johtaa jokaiselle vektorin alkioille. (Järvinen 2011: 17.)



Kuva 14. Doppler- ilmiön ja laskentakaavan havainnollistaminen

a) Nopeudet yhtälössä 1 ovat positiivisia, kun lähde ja havaitsija liikkuvat samaan suuntaan.

b) LIDAR-mittauksessa LIDAR on sekä lähde että havaitsija.

(Järvinen 2011: 18.)

4.2 SODAR

SODAR (SOund Detection And Ranging) järjestelmällä voidaan tehdä mittauksia sijoittamatta aktiivisia sensoreita mittauspisteeseen, ja näin ollen se on luokiteltu kaukokartoitusjärjestelmäksi. Mittausjärjestelmä ei tarvitse kallista mastoa tai tornia, johon sijoittaa antureita ja mittalaitteita. Aikaisemmin sitä on käytetty eritoten meteorologiin ja ilmakehän mittauksiin ja vasta viime aikoina on alettu käyttää SODARIA tuulenmittauksissa. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 80.)

SODAR perustuu äänen takaisinsirontaan. Jotta saadaan SODARin avulla mitattua tuulta, äänipulssit lähetään pystysuorassa ylös ja pienessä kulmassa pystysuorasta. Jotta saadaan kolmeulotteinen tuulen nopeus, tarvitaan ainakin kolme eri palkkia eri suunnista. Äänipulssi lähetetään ilmaan, jossa olevista partikkeleista tai ilman taiteker-toimen vaihteluista ääni heijastuu takaisin. Näitä vaihteluita voi aiheuttaa tuuliväanne, lämpötila ja kosteusprosentti. Äänihajonta palaa maahan ja kerätään mikrofoneilla. Kun lähettäjä ja kerääjä ovat samassa pisteessä, SODAR on monostaattinen. Tällä hetkellä tuulenmittauskäytössä olevat SODARit ovat monostaattisia, koska ne ovat yksinkertaisempia suunnitella ja pienempikokoisia. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 80.)

SODAR-tekniikka lähettää ääniaaltoja ja toimii kuten tutka, joka lähettää radiosignaalia. SODAR antaa käyttäjälle tietoja ilmakehän turbulenssista sekä tuulen nopeudesta ja suunnasta eri korkeuksilla (20-200m), mittaamalla ääniaallon sirontaa ja doppler-ilmion aiheuttamaa taajuuden muutosta. Kuvassa 15 näkyy mittalaitteeseen suunnitellut akustisten torvikaiuttimien paraboliset lautaset, joiden avulla voidaan mitata kolmiulotteista tuulikenttää suurella tarkkuudella. AQ500 Wind Finder lähettää lyhyet äänipulssit kolmeen suuntaan 120 asteen erotuksella. Kaiutinjärjestelmä on suunniteltu erityisesti suojaamaan kaiuttimen elementtejä, joihin ääni heijastuu parabolisten lautasten kautta. Järjestelyn avulla saavutetaan huoltovapaus ja korkea tietojen saatavuus myös rankassa lumi- ja vesisateessa. (Tuulisampo.)



Kuva 15. SODARin ydin – äänitorvet ja peilit (Tuulisampo).

Mikrofoni kerää palaavat äänisignaalit eli pulssit. Signaalista analysoidaan sen vahvuus sekä taajuus (doppler) ja näiden tietojen perusteella voidaan laskea tuulen nopeus, suunta ja ilmavirtojen luonne ilmakehässä. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 80–81.)

Perinteisessä SODARissa on kolme lähetintä, kuten kuvassa 15 on esitetty, ja tämä tekee niistä herkkiä suuntaukselle, joten niiden pitää olla tarkasti kalibroitu. Viimeisintä teknologiaa oleva SODAR, kuvassa 16, on vaiheistetulla ryhmäantennilla varustettu ja siihen on sijoiteltu monta pientä lähetintä. Suunnat muodostetaan rivin ja sarakkeiden viivästyksellä, jolla saavutetaan haluttu lähetyskulma, jota pystytään säätämään. (Hafmex.)



Kuva 16. Vaiheistettu ryhmä SODAR (Hafmex).

Hafmexin Suomessa edustama Toragon AB:n Ruotsissa valmistama WindCollector2 edustaa edellä kuvailtua viimeisintä teknologiaa. Valmistaja lupaa mittauskorkeudeksi jopa 500 metriä ja tuuliprofiilin koko pyyhkäisyaluealta. Laitteessa on monipuolinen käyttöliittymä ja sitä voi hallinnoida helposti etäyhteyden välityksellä käyttäjän omalta tietokoneelta. SODAR-laite kulkee keveytensä ansiosta helposti ja koko mittauslaitteisto on integroitu traileriin, joka on esitetty kuvassa 17. (Hafmex.)

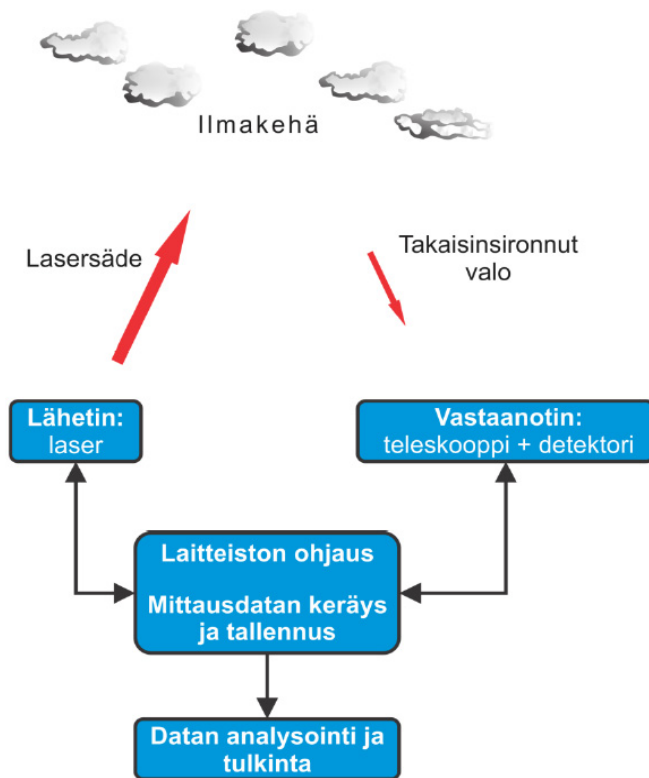


Kuva 17. WindCollector2- traileri (Hafmex).

Yhteenvedona voidaan siis sanoa, että SODAR-mittausjärjestelmät kehittyvät koko ajan. Ennen 200 metrin mittauskorkeus on noussut jo 500 metriin, mikä on suuri etu uusien tuulimyllyjen lapojen yltäessä yhä korkeammalle. SODAR on helposti liikuteltava mittausjärjestelmä eikä se tarvitse rakennuslupaa, kuten masto ja perinteiset siihen sijoitettavat tuulenmittausjärjestelmät. SODARin eduksi on myös luettava sen kyky mitata useammasta korkeudesta samanaikaisesti.

4.3 LIDAR

LIDAR (LIght Detection And Ranging) on myös luokiteltu kaukokartoitusjärjestelmäksi ja vastaa hyvin pitkälti järjestelmänä SODAR – teknologiaa. Sillä voidaan myös mitata kolmiulotteisesta tuulikentästä tuuliolosuhteita. Tässä järjestelmässä lähetetään valosäde, joka on vuorovaikutuksessa ilman kanssa ja osa valosta siroaa takaisin LIDARille. Palannut valo analysoidaan ja määritellään nopeus ja suunta hiukkaselle, joista valo on sironnut takaisin. LIDARin peruseriaate perustuu Doppler-ilmiön tuottamiin tuloksiin, johon vaikuttavat luonnolliset aerosolit, joita tuuli kuljettaa mukanaan. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 81.) Kuvasta 18 nähdään LIDAR-laitteiston pääosat ja toimintaperiaate (Järvinen 2011: 11).



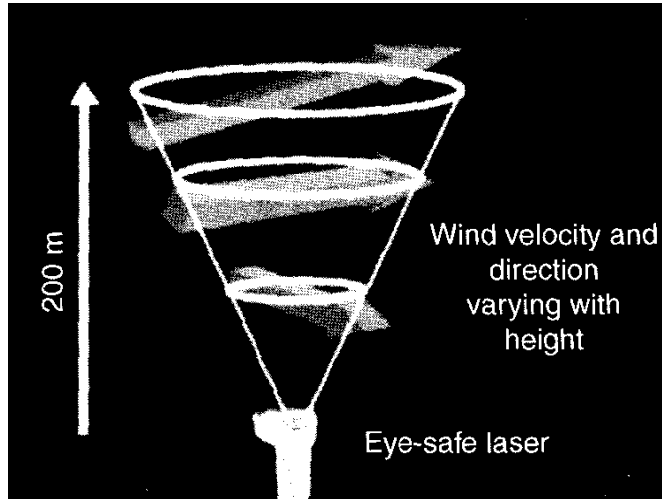
Kuva 18. LIDAR-laitteiston osat ja toimintaperiaate (Järvinen, S. 2011: 11).

LIDARia on hyödynnetty laajasti meteorologian ja ilmatilan sovelluksiin, joissa järjestelmän kustannukset ovat melko korkeat. Kaupallisten LIDAR-järjestelmien kehitys on tuonut saataville halvempia järjestelmiä, joilla tuulen nopeuden määrittäminen onnistuu tuulienergiateollisuuden vaatimilla korkeuksilla. Lisäksi turvallisuuskysymykset on ratkaistu, koska suurin osa LIDAR-lasereita lähettää silmille turvallista aallonpituutta, joka on 1,5 mikronia. Käyttäen uusia järjestelmiä on viime aikoina saatu molemmat maa- sekä merituuli LIDAR-sovellutukset. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 81.)

Tällä hetkellä on olemassa kahta tyyppiä kaupallista LIDAR tuulitekniä sovellusta: 1) jatkuva-aalto, muuttuva painopistemalli ja 2) pulssi-LIDAR kiinteällä tarkennuksella. Tuulen nopeuksia aina 200 metrin korkeuteen asti on mitattu molemmilla LIDAR-järjestelmillä. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 81.)

Kuvassa 19 on esimerkki jatkuva-aaltoisesta LIDAR-järjestelmästä, jossa kannettavaa ja pienikokoista LIDARia käytettiin määrittämään vaaka- ja pystytuulen nopeus ja suunta 200 metrin korkeuteen asti. LIDAR valonsäde on asetettu 30 asteen kulmaan

pystysuorasta. Valonsäde pyörii yhden kierroksen sekunnissa ja skannaa tuulta eri kulumista sekä rakentaa tuulen nopeudesta kartan. Tyypillisesti tehdään kolme skannusta jokaisesta viidestä mittauskorkeudesta. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 81.)

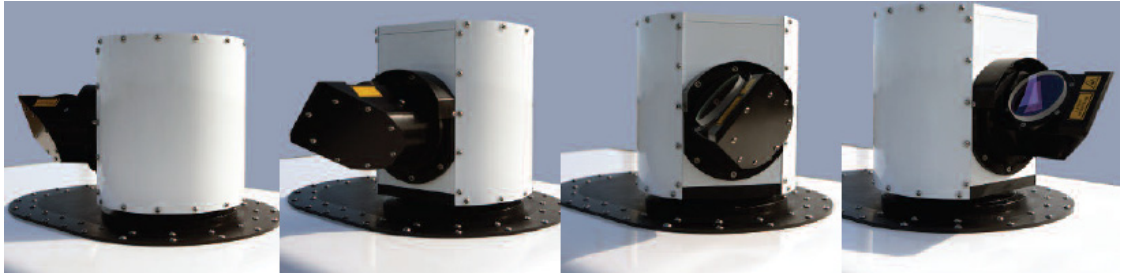


Kuva 19. LIDARin skannausperiaate (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 82).

Esimerkkinä LIDARista käytän SgurrEnergy Ltd:n Galion LIDAR-laitetta, koska heiltä sain sähköpostitse ainoan hinta-arvion LIDAR-mittausjärjestelmästä. Kuvassa 20 on Galion LIDAR.

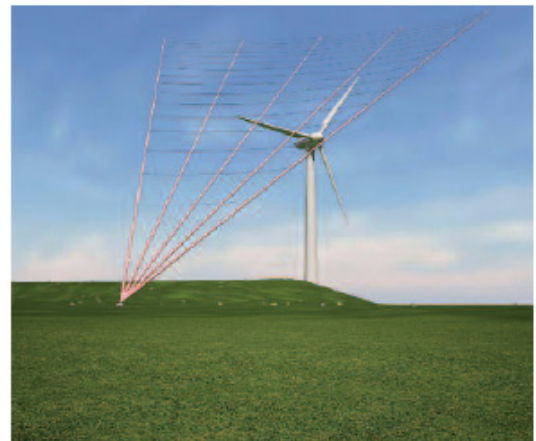
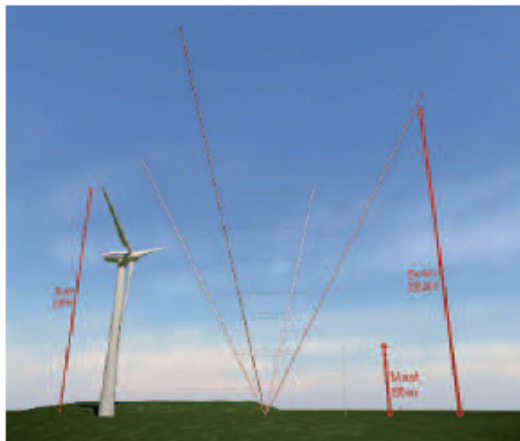


Kuva 20. Galion LIDAR (SgurrEnergy).

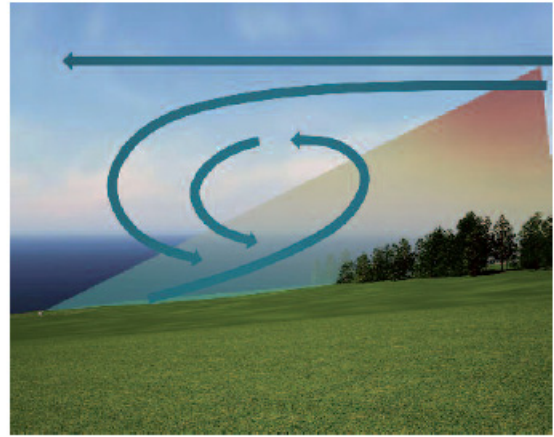
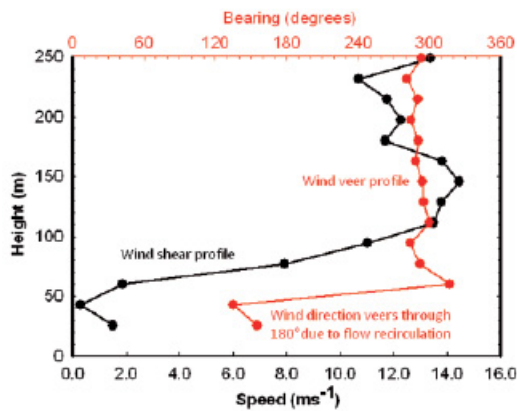


Kuva 21. Galionin kääntyvä laserlähetin (SgurrEnergy) .

Galion lähettää lasersäteitä pulsseina. Liikkuva lähetin, kuvassa 21, pystyy lähettämään säteitä useaan eri suuntaan. Yhdestä asennuspaikasta Galion pystyy tekemään useita eri mittauksia, kuten kuvassa 22 näkyy. Kuvassa vasemmalla nähdään myös, kuinka Galionin mittauskorkeus on paljon korkeammalla kuin tuuliturbiinin lavat tai paljon lapojakin alemmas jäävä mittaustasto. Galion pystyy tekemään kattavan tuulikuvan myös turbulenttisista tuuliolosuhteista, kuten kuvassa 23 on esitetty. (SgurrEnergy.)



Kuva 22. Useita mahdollisia mittauksia yhdellä asennuksella (SgurrEnergy).



Kuva 23. Turbulenttien tuuliolosuhteiden mallinnus (SgurrEnergy).

Galion LIDAR-laite on testattu Tanskassa teknillisessä korkeakoulussa, jossa verrattiin Galionin mittauksia perinteisiin mastomittauksiin. Galion on testattu toimivan ympäristöolosuhteissa, jotka vaihtelevat – 15 ja +35 celsiusasteen välillä. Kevyt 85 kiloa painava laite on helppo liikutella ja siihen ei tarvita rakennuslupaa. Etäkäytöllä se kertoo reaaliaikaista tietoa tuulesta ja se antaa tarkat mittaukset monimutkaisistakin maastoista. (SgurrEnergy.)

On odotettavissa, että enemmän tutkimusta ja kehitystyötä tullaan tekemään tuulienergian LIDAR- sovelluksiin, koska tulevaisuudessa tullaan tarvitsemaan lisää hintatehokkaampia tuulen mittausjärjestelmiä yhä suuremmille mittauskorkeuksille, joita yhä suuremmat tuuliturbiinit vaativat. (Manwell, McGowan & Rogers 2009: 81.)

5 AKKREDITOINTI

Akkreditointi tarkoittaa pätevyyden toteamista. Se on menettelytapa, joka perustuu kansainvälisiin kriteereihin. Akkreditoinnin avulla toimielimen pätevyys ja sen antamien todistusten uskottavuus voidaan luotettavasti todeta. Akkreditoinnin hakija voi itse määritellä toiminta-alueen, jolle sitä hakee ja sen hakeminen on vapaaehtoista. (FINAS.)

FINAS (Finnish Accreditation Service) on Suomen kansallinen akkreditointielin. Sen tekemät akkreditoinnit perustuvat kansainvälisiin standardeihin, joita ovat EN 45000, ISO 15000 ja ISO 17000. FINAS- akkreditointipalvelu akkreditoi eli toteaa päteväksi

kalibrointi- ja testauslaboratorioita, sertifiointielimiä, tarkastuslaitoksia, vertailumittauksen järjestäjiä, päästökauppa- sekä EMAS- todentajia. (FINAS.)

5.1 Ensiarvionti

Ensimmäistä akkreditointia tai arviointia haetaan hakemuksella, jossa esitetään hakijaa koskevat tiedot sekä kuvaus arvioitavasta toiminnasta eli haettava pätevyysalue. Hakemus toimitetaan kirjallisena FINASiin ja siten hakija sitoutuu antamaan FINAS-akkreditointipalvelun käyttöön pyydytetyt, pätevyyden arviointimenettelyssä tarvittavat tiedot ja hyväksyy FINAS-akkreditointipalvelun määrittelemät arviointitoimenpiteet. (FINAS Tiedote 1: 6.)

Kun FINAS saa hakemuksen, se on yhteydessä asiakkaaseen selvittääkseen hakijan tarpeet sekä yhdessä hakijan kanssa hakemukseen mahdollisesti liittyvät lakisääteiset ja muut vaatimukset, jotka hakemuksen käsittelyssä tulee ottaa huomioon. FINASin kokoama arviointiryhmä koostuu henkilöistä, joilla on riittävä asiantuntemus hakijan esittämällä pätevyysalueella. Pääarvioija toimii arviointiryhmän vetäjänä ja hänen lisäksi ryhmässä on yleensä yksi tai useampi arviointitehtäviin koulutettu tekninen arvioija tai tekninen asiantuntija. Arviointiryhmän jäsenien on oltava päteviä ja esteettömiä ja arvioitavan asiakkaan on hyväksyttävä heidät. Kaikki arviointiryhmän jäsenet ovat salassapitovelvollisia ja heidän on allekirjoitettava kirjallinen sitoumus. (FINAS Tiedote 1: 6.)

Uusien hakijoiden arviointiprosessi alkaa useimmiten alustavalla arviointikäynnillä, jolloin arvioidaan hakijan valmius arviointivaatimuksiin nähden sekä sovitaan arviointiprosessin etenemisestä ja varsinaisen arviointi käynnin toteutuksesta, mahdollisesta toiminnan seurannasta ja muusta osaamisen näytöstä. Jos hakijalla ei ole edellytyksiä arvioinnin jatkamiseen, alustavan arvioinnin tuloksena voi myös olla arviointiprosessin keskeyttäminen. (FINAS Tiedote 1: 6-7.)

Kun arviointia suunnitellaan, FINAS sopii asiakkaan ja arviointiryhmän kanssa arvioinnin ajankohdasta ja sisällöstä. Arviointikäynnit tehdään keskeisiin toimipaikkoihin ja suunnittelussa on huomioitava pätevyysalueen laajuus, toimipisteet sekä avaintoiminnot. Arviointikäynnin lisäksi muita arviointitoimenpiteistä ovat mahdollisesta kenttätoiminnan seurannasta ja pätevyyuskokeista. (FINAS Tiedote 1:7.)

Varsinaisessa arvioinnissa arviointiryhmän tehtävä on arvioida, miten asiakas täyttää akkreditoinnin vaatimukset hakemuksessa esitetyllä pätevyysalueella. Johtoa, vastuuhenkilöitä ja henkilökuntaa haastatellaan sekä toimintaa seurataan, lisäksi ohjeita ja tiedostoja katsotaan. Näin varmistutaan toiminnan pätevyydestä ja tulosten tai sertifi-kaattien luotettavuudesta. Niiltä osin, jossa akkreditointivaatimukset eivät täyty, kirjataan poikkeamiksi. Esille tulleet poikkeamat ja niiden perustelut sekä johtopäätökset arvioinnista esitetään arvioinnin päätteeksi asiakkaalle yhteenvedossa. Poikkeamat tulee korjata ennen kuin arviointi etenee ja korjauksista tehdään selonteko arviointiryhmälle, joka arvioi niiden riittävyyden ja pyytää tarvittaessa täydennystä korjaaviin toimenpiteisiin. Vasta kun kaikki poikkeamat on korjattu ja korjaavat toimenpiteet on todettu riittäviksi, voidaan myöntää akkreditointi. (FINAS Tiedote 1: 7-8.)

Akkreditointivaatimusten täytyttyä pääarvioija laatii arvioinnista kokoavan katsauksen, jossa esitetään akkreditointipäätöksen perustelut. Lopullisen akkreditointipäätöksen tekee FINASin johtaja ja se tehdään pääsääntöisesti neljäksi vuodeksi, mutta erityistapauksessa se voidaan tehdä lyhyemmäksi ajaksi. (FINAS Tiedote 1: 8.)

5.2 Akkreditoinnin ylläpito

Akkreditoinnin ylläpitämiseksi täytyy tehdä määräaikaisarviointeja, joiden toteuttaminen suunnitellaan etukäteen. Akkreditointipäätöksestä seuraavan neljän vuoden aikana, jolloin akkreditointi on voimassa, tehdään määräaikaisarviointeja pääsääntöisesti kerran vuodessa. Ensimmäinen arviointikäynti tehdään 6–9 kuukauden kuluttua päätöksestä. Määräaikaisarviointi tehdään samoilla periaatteilla kuin ensiarviointi, mutta poikkeamien korjaamiseen annettava aika on lyhyempi ja toimiin on alettava heti. Jos poikkeama on merkittävä ja sen korjaaminen viivästyy, saatetaan kyseinen pätevyysalue väliaikaisesti peruuttaa. Määräaikaisarvioinnissa ei välttämättä tarkastella koko akkreditoitua toimintaa, vaan voidaan keskittyä eri kerroilla toiminnan eri osa-alueisiin niin, jotta varmistetaan kriittisten osa-alueiden arviointi riittävän tiheästi ja syvällisesti. Akkreditointikaudella arviointien tulee kattaa kuitenkin koko pätevyysalueella tapahtuva toiminta. (FINAS Tiedote 1: 9.)

Uudelleenakkreditointi vaatii arvioinnin, jossa noudatetaan samoja periaatteita kuin ensiarvioinnissa. Uudelleenarviointi tehdään edellisen akkreditointikauden viimeisenä voimassaolovuotena, hyödyntäen asiakkaan toiminnasta aikaisemmissa arvioinneissa

saatua tietoa ja se kohdistetaan koko pätevyysalueeseen ja niihin toimipisteisiin, joissa on avainalueisiin kuuluvaa toimintaa. (FINAS Tiedote 1: 9.)

Akkreditointipäätökseen voi asiakas esittää laajennusta tai muutoksia ja ne arvioidaan hakemuksen perusteella. Hakemusaineistossa tulee esittää perusteet pätevyydelle, jos hakemus koskee pätevyysalueen laajennusta. FINAS päättää sovellettavista arviointimenettelyistä, esimerkiksi pätevyysalueen suppea laajennus voidaan arvioida määräaika-arvioinnin yhteydessä tai arviointi voidaan myös tehdä pelkästään dokumenttien perusteella. Kokonaan uusi arviointi ja arviointiryhmä tarvitaan silloin kun, kyseessä on laaja pätevyysalueen laajennushakemus kuten uudet osa-alueet ja uudet tekniikat. Akkreditoinnin muutospäätöksellä vahvistetaan pätevyysalueen laajennukset ja muutokset. (FINAS Tiedote 1: 9-10.)

Akkreditoinnista voi luopua ilmoittamalla asiasta kirjallisesti FINAS- akkreditointipalvelulle. FINAS voi supistaa akkreditoinnin pätevyysaluetta tai peruuttaa akkreditoinnin määräajaksi, jos määräaika-arvioinnissa tai muun arvioinnin tuloksena todetaan, että akkreditoinnin edellytykset eivät täyty. Ennen kuitenkin asiakkaalla on mahdollista tehdä määräajan kuluessa korjaavat toimenpiteet, joiden riittävyyttä tarkastellaan. Jos tilapäisen peruutuksen jälkeen arvioidaan, että akkreditointivaatimukset eivät edelleenkään täyty, akkreditointi peruutetaan kokonaan. (FINAS Tiedote 1: 10.)

5.3 Oikeudet ja velvoitteet

Asiakkaan tulee täyttää jatkuvasti voimassa olevat akkreditointivaatimukset sekä muut akkreditoinnin edellytykset. Kaikista akkreditointiin vaikuttavista muutoksista tulee ilmoittaa FINAS- akkreditointipalvelun, joka taas ilmoittaa asiakkaalle mahdollisista muutoksista akkreditointivaatimuksissa. Asiakkaan tulee osoittaa täyttävänsä muuttuneet vaatimukset annetun siirtymäajan kuluessa. Jos näin ei tapahdu, akkreditoinnin voimassaolo päättyy siirtymäkauden jälkeen. (FINAS Tiedote 1: 11.)

Asiakas saa akkreditointitunnuksen käyttöönsä akkreditoinnin myöntämisen yhteydessä ja näitä tunnuksia voi käyttää akkreditoidun toiminnan tuloksena syntyvissä raporteissa ja todistuksissa osoittaa tulosten pätevyyttä. Tunnuksia ei ole pakko käyttää, mutta akkreditoinnin avulla osoitettuun pätevyyteen ei voida vedota, jos tulosten yhteydessä ei ole akkreditointitunnusta tai muuta yksiselitteistä viittausta akkreditointiin. (FINAS Tiedote 1: 11.)

Akkreditointipalvelusta syntyvät kustannukset arvioidaan ennen arvioinnin aloittamista ja asiakkaalta laskutetaan toteutuneiden kustannusten perusteella. Arvioitua kustannusta voi kasvattaa esimerkiksi todettujen poikkeamien korjausten arviointi, lisäkorjausten pyytäminen ja niihin liittyvät ylimääräiset arvionnit. Jotta akkreditointi pysyisi voimassa, akkreditoinnista aiheutuvat maksut on suoritettava ajallaan. (FINAS Tiedote 1: 12.)

Akkreditoitu asiakas ei voi käyttää akkreditointistandardeja tarjotakseen samansisällöistä arviointipalvelua kuin akkreditointielin eli FINAS. Alihankkijoidensa arvioinnissa asiakas voi käyttää standardeja, mutta arvioinnin tuloksista tulee näkyä selvästi, että kyseessä on alihankintatarkoitukseen tehty arviointi. Akkreditoinnin peruutusprosessi voidaan käynnistää, jos akkreditointistandardeja käytetään väärin. (FINAS Tiedote 1: 12.)

5.4 KyAMK:n akkreditointi

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun tekniikan ja liikennetoimialan teknologiapalveluilla on jo olemassa voimassa akkreditointi kolmelta pätevyysalueelta, päästömittaus- ja rakennustekniikan laboratorioden osaamisalueelta. Pätevyysalueet ovat seuraavat:

- Päästömittaukset: prosessiteollisuuden sekä moottoreiden poistokaasut, kenttätestaus
- Päästökauppaan liittyvät analyysit; polttoaineen testaus
- Materiaalitestaus; betonitestaus

Pätevyysalueiden laajentamista tullaan esittämään sisältämään myös tuulenmittaukset SODAR-järjestelmällä.

6 KUSTANNUKSET

Kustannusten vertailu aloitettiin mastoratkaisusta, jota ensin harkittiin hankittavaksi. Mastoratkaisu, jota Vaisala Oyj ensin tarjosi, sisälsi maston ja siihen täydellisen mitausjärjestelmän kuppianemometreineen ja tuuliviireineen. Vaisala tarjosi myös järjestelmää, jossa tuulta olisi mitattu ultraäänianemometreillä. Tässä vaiheessa todettiin Vaisalan tarjoama masto kalliiksi ja kyseltiin mahdollisuutta vuokrata masto EmPower Oy:ltä, joka sekin osoittautui varsin hinnakkaaksi.

Selvitystyö muilta osin oli päässyt siihen vaiheeseen, että maston rakentamisen todettiin olevan rakennuslupakäytännön vuoksi erittäin hankalaa hankkeen puitteissa, joten vaihtoehtojen tarkastelua laajennettiin muihinkin tuulenmittausjärjestelmiin. Ensin vertailua tehtiin sähköpostikyselyin eri yritysten tarjoamista tuotteista, niiden ominaisuuksista ja hintaluokista. LIDAR-mittausjärjestelmä osoittautui sekin liian kalliiksi, joten keskityttiin SODAR-järjestelmiin. Niitä tarkasteltiin tarkemmin ja vertailtiin tarjouskilpailuun lähetettyjen tarjousten perusteella.

SODAR-mittausjärjestelmistä tehtiin kilpailutus, jonka tuloksena saatiin kolme virallista tarjousta. Tarjouksissa painotettiin hintaa 30 %, toimintaolosuhteita 30 %, muita teknisiä ja toiminnallisia ominaisuuksia 20 % sekä huoltoa ja muita muunnin jälkeisiä palveluita 20 %. Kun tarjouksia vertailtiin, tultiin siihen tulokseen, että hankittaisiin Hafmex Engineering Oy:n tarjoama WindCollector2, joka on kuvassa 17. WindCollector2 ei ollut kaikista halvin tarjottu laite, mutta muissa osa-alueissa se oli parempi kuin muut tarjotut laitteet.

Taulukossa 1 vertaillaan kaikkien tarkasteltujen tuulenmittauslaitteistojen verottomia hintoja, joten hankintaa tehdessä on lisättävä hintaan veron osuus. Hinnat perustuvat joko tehtyihin tarjouksiin tai yritysten edustajien tekemiin hinta-arvioihin.

Taulukko 1. Tuulenmittauslaitteistojen hintoja

	Masto vaihtoehdot:	Mittarit	Masto	Yhteensä	
1	Masto ja mittarit(kuppi) Vaisalalta	31 650 €	88 300 €	119 950 €	Vaisalan tarjous1
2	Ultrasonic Vaisala	21 320-35 115€			Vaisalan tarjous2
3	Masto EmPowerilta vuodeksi vuokralle		45-50 000€		Sähköpostilla arvio
	LIDAR:				
4	LIDAR SgurrEnergy Ltd		£125 000	n. 152 700 €	Sähköpostilla arvio
	SODAR vaihtoehdot:				
5	SODAR HafmexGroup			87 500 €	Tarjouskilpailu tarjous
6	SODAR Tuulisampo			77 050 €	Tarjouskilpailu tarjous
7	SODAR Metek			101 344.60 €	Tarjouskilpailu tarjous

7 KILPAILUTILANNE

Tarkastelussa Suomesta löytyi kahdeksan tuulenmittauspalveluiden tarjoajaa, jotka mittaavat niiltä korkeuksilta, joista Kymenlaakson ammattikorkeakoululle hankittavalla mittausjärjestelmällä olisi tarkoitus mitata. Mittauksia tehdään pääsääntöisesti mastoratkaisuilla, ja kolme yritystä kertoo käyttävänsä SODARia.

Yksi SODARia mittauksissaan käyttäviä yrityksiä oli Hafmex Group, jolta Kymenlaakson ammattikorkeakoululle hankittava SODAR päätettiin ostaa. Hafmex tarjoaa kattavan palvelukokonaisuuden aina tuulimittauksen projektisuunnitelmasta lähtien datan keräämiseen ja sen käsittelyyn. Mittaukset räätälöidään asiakkaan tarpeiden mukaan ja mittausjaksot vaihtelevat kolmesta kuukaudesta vuoteen. Hafmexin mittauksissaan käyttämä SODAR mittaa 5 metrin välein ja aina 200 metriin asti. Hafmex Group tarjoaa myös tuulenmittauksia mastoratkaisuilla, joissa perinteiset tuulimittarit sijoitetaan jo olemassa oleviin GSM-mastoihin. (Hafmex.)

Tarjouksen kilpailutukseen teki myös Tuulisampo Oy omalla suomalaisiin ilmasto-olosuhteisiin kehitetyllä AQ 500Wind Finder-laitteistolla. Tuulisampo hoitaa kaiken mittaamiseen liittyvän toiminnan ja tarkistaa datan laadun sekä laatii myös tuulisuusraportin mittausjaksolta asiakkaan niin halutessa erillisen sopimuksen mukaan. (Tuulisampo.)

Kaksi edellä mainittua yritystä myy mittauslaitteistoja mittauspalveluiden lisäksi, mutta porilainen YRJtechnology Oy on keskittynyt mittaustoimintaan. YRJtechnology Oy tekee tuulimittauksia ns. putkimastoista, GSM-mastoista ja napakorkeuteen ulottuvista alumiinimastoista ja lisäksi AQSystemsin SODAR laitteistolla. Yhtiöllä on kokemusta tuulivoimasta lähes kahden vuosikymmenen ajalta. (YRJtechnology.)

Muita tuulenmittauspalveluita tarjoajia ovat Vaisala Oy, EmPower Oy, Ilmatieteen laitos, Pöyry Finland Oy sekä TuuliSaimaa Oy. He tarjoavat tuulenmittausta mastoratkaisuin tai eivät kerro mittautapaansa kotisivuillaan.

8 LOPPUPÄÄTELMÄT

Tutkimuksessa saatiin selvitettyä kattavasti kaupalliseen tuulenmittauskäyttöön soveltuvat tuulenmittausjärjestelmät, joita voidaan käyttää tuulivoimateollisuuden tarpeisiin. Saatiin selville kunkin järjestelmän tekniset ominaisuudet sekä kustannukset. Selvitystyön tuloksena Kymenlaakson ammattikorkeakoulu pystyi kilpailuttaan sopivimman mittausjärjestelmän ja päättämään hankinnasta.

Erilaisia tuulenmittausjärjestelmiä on jo kehitetty ja vielä on todennäköistä, että kehitystyön tuloksena saadaan uusia yhä parempia menetelmiä. Tuulivoimaenergian tuotannon kannalta on tärkeää saada halvempia, tarkempia ja reaaliaikaisia mittausmenetelmiä.

LÄHTEET

About Sodar.[Viitattu:12.4.2012]Saatavilla Internetissä:

http://sodar.com/about_sodar.htm

Alliance for Coastel Technologies [Viitattu: 24.4.2012] Saatavilla Internetissä:

<http://www.act-us.info/sensordetail.php?ID=9706&cat=&type=>

FINAS, yrityksen kotisivut [Viitattu: 2.5.2012] Saatavilla Internetissä:

<http://www.mikes.fi/frameset.aspx?url=finas.aspx%3FcategoryID=2>

FINAS Tiedote 1: FINAS- akkreditointipalvelun menettelyt akkreditointi- ja arviontoiminnassa. 2012

FINAS, Akkreditointi päätös. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu Oy Tekniikka ja liikenne teknologiapalvelut. 2011

Finavia, [Viitattu: 7.5.2012] Saatavilla Internetissä:

<http://www.finavia.fi/tietoafinaviasta/lentoesteet>

Haapanen, Erkki: Tuulimittausten merkitys ja mahdollisuudet tuulipuiston suunnittelussa ja käytössä. Diasarja 2010 Saatavilla Internetissä:

<http://www.tuulisampo.fi/assets/files/tuulimittauksista.pdf>

Hafmex, yrityksen kotisivut, [Viitattu:8.5.2012] Saatavilla Internetissä:

<http://www.hafmex.fi>

Ilmailuasetus 26.2.1996/118

Järvinen, Samu: Tuulen nopeuden etämittausta LIDAR-teknologian avulla. Diplomityö 2011

Leskinen, Matti: Tuulimittareita ja tuulen havainnointia 1800-luvun Suomessa. Saatavissa Internetissä:

http://www.geo.fmi.fi/MAGN/Museokuvat/Laitteisiin_liittyvia_kirjoituksia/Tuulimittarit=Leskinen.pdf

Manwell, James; McGowan, Jon; Rogers Anthony (2009). Wind Energy Explained: Theory, design and application. John Wiley & Sons, Incorporated.

Metek: Ultrasonic Wind Sensor uSonic-3 Scientific – esite

MRA, Maankäyttö- ja rakennusasetus 10.9.1999/895

MRL, Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132

RENEWTECH- Tuulivoimateknologian ja – liiketoiminnan kehittäminen. Projektin aloituskokouksen pöytäkirja

RENEWTECH- Tuulivoimateknologian ja – liiketoiminnan kehittäminen, osaprojektin kuvaus: T&K, testaus- ja mittauspalveluiden sekä osaamisrakenteiden kehittäminen

Rinne, Janne: Tuulennopeuden ja suunnan mittaus. Luentomateriaali 2005

SgurrEnergy, Galion Wind LIDAR – esite [Viitattu:8.5.2012] Saatavilla Internetissä: <http://www.sgurrenergy.com/>

Tuulisampo, yrityksen kotisivut [Viitattu:8.5.2012] Saatavilla Internetissä: <http://www.tuulisampo.fi/>

Vaisala, yrityksen kotisivut [Viitattu:8.5.2012] Saatavilla Internetissä: <http://www.vaisala.fi>

Vaisala tarjous 1, System description, Wind resource assessment with Vaisala Wind Tower Systems in Finland for Kymenlaakson ammattikorkeakoulu

Vaisala tarjous 2, Vaisala Wind Tower System WT700

Vaisala WINDCAP®- esite [Viitattu:8.5.2012] Saatavilla Internetissä: http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/Technology%20Descriptions/WINDCAP_technology.pdf

Vaisala WAA151 käyttäjän opas. [Viitattu:8.5.2012] Saatavilla Internetissä:

http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/WAA151_User_Guide_in_English.pdf

Vaisala WAV151 käyttäjän opas. [Viitattu:8.5.2012] Saatavilla Internetissä:

http://www.vaisala.fi/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/WAV151_User_Guide_in_English.pdf

Ympäristöministeriö: Ympäristöopas 107 Matot maisemassa (2003). Saatavissa Internetissä: <http://www.ymparisto.fi/julkaisut>

YRJtechnology, yrityksen kotisivut [Viitattu:8.5.2012] Saatavilla Internetissä:

<http://www.yrjtechnology.fi/index.html>